

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL NA CAPACIDADE PORTANTE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO NO DOMÍNIO 3

Renan André Feltrin (1); Bruno do Vale Silva (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) *renan_since1987@hotmail.com*; (2) *dovalesilva@unesc.net*

RESUMO

Um das principais características do concreto armado é sua adaptabilidade em qualquer formato estrutural e a capacidade de atender diversas finalidades. O presente trabalho faz a análise da capacidade portante de vigas de concreto armado no domínio 3. Para realização do trabalho, foram utilizados conceitos importantes a respeito do concreto armado e sua composição. Assim como conceitos de concreto armado, foi mostrada a forma adequada no processo de execução, de acordo com as Normas da NBR 6118:2003. Após análise teórica, foram feitos ensaios de carga objetivando constatar a seção de viga que mais suporta o carregamento. Para análise, foram experimentadas quatro diferentes seções de vigas: seção retangular, trapezoidal, trapezoidal invertida e seção T, mantendo a mesma altura para todas as seções, submetendo-as a ensaios de flexão e deslocamento. O experimento foi baseado no estudo de Laurindo (2012), buscando-se fazer uma nova verificação da viga mais vantajosa a ser utilizada, diferenciando-se por ser realizada no domínio 3. Os resultados mostram que as vigas no domínio 3 resistem em média quatro vezes mais que as vigas dimensionadas com armadura mínima.

Palavras-Chave: Concreto armado. Vigas de concreto. Capacidade portante. Domínio 3.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é hoje utilizado em todos os tipos de estruturas e, devido seu custo mais baixo, está ocupando de forma cada vez maior lugares que antes era exclusivo de outros materiais.

O trabalho conjunto do aço e do concreto, garantido pela aderência entre esses dois materiais, confere ao concreto armado a qualidade de ser um recurso viável, durável e de grande confiabilidade.

O concreto armado, devido sua composição, adapta-se a qualquer forma estrutural, isto é, atende a vários objetivos arquitetônicos em várias áreas do país, o que não se difere no município de Criciúma, localizado no sul de Santa Catarina e seu entorno. Essa característica do concreto armado faz com que o mesmo seja

muito utilizado tanto em obras públicas quanto em obras privadas. Além das características citadas, o concreto armado se distingue de outros materiais pelo fato de sua resistência poder aumentar com o tempo.

Apesar da importância do concreto armado, para que o mesmo seja aproveitado, é preciso planejamento adequado definindo as propriedades desejadas para ele e cuidados específicos em sua execução, como os equipamentos utilizados na mistura, transporte, adensamento e cura.

Dos elementos que compõem um sistema estrutural, as vigas possuem destaque, já que estão presentes nas obras em grande quantidade, especialmente em estruturas consideradas convencionais.

A capacidade resistente à flexão das vigas tem relação direta com a geometria da seção transversal, ou seja, do momento de inércia de cada seção. O momento de inércia define a capacidade resistente da viga, uma vez que diferentes considerações de cálculo deverão ser observadas de acordo com a tipologia da seção transversal utilizada.

A influência de seções transversais na resistência à flexão de vigas em concreto armado será analisada experimentalmente neste trabalho, visto que as vigas em concreto armado terão a mesma altura, mesma resistência à compressão e área de aço no domínio 3, de acordo com a norma NBR 6118:2003.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é verificar a capacidade de carga em vigas de concreto armado, trabalhadas no domínio de cálculo 3, com diferentes tipos de seção transversal, sendo as vigas biapoiadas em escala real, rotuladas nas extremidades e sujeitas a flexão.

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

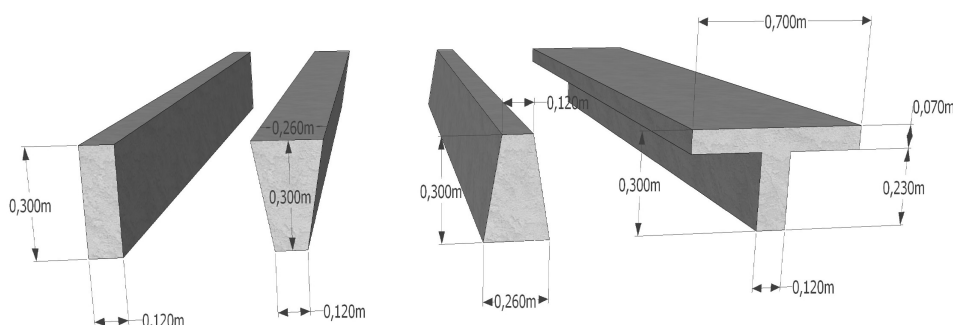
- Dimensionar e detalhar vigas com comprimentos iguais e seções transversais distintas.
- Fabricar três exemplares de cada uma das vigas dimensionadas em escala real.
- Submeter as vigas dimensionadas em escala real a ensaios de flexão em quatro pontos.

- Aferir de forma experimental as cargas aplicadas objetivando atingir a deformação máxima indicada pela NBR 6118:2003 para cada uma das amostras.
- Verificar a carga máxima suportada por cada viga até sua ruptura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, foram confeccionadas o total de 12 vigas com quatro tipologias distintas, isto é, três vigas para cada tipologia de seção transversal, conforme proposto por Laurindo (2012), porém, com dimensionamento da armadura para o domínio 3, de acordo com a figura 1.

Figura 1: Detalhe das seções transversais.



Fonte: Autor (2014)

Na confecção das doze vigas foram utilizados os mesmos materiais, isto é, fôrmas de madeira em “Pinus”, confeccionadas de modo a obter as seções desejadas de cada viga, concreto usinado com resistência característica de 25 MPa e armadura dimensionada para o domínio 3. Os estribos apresentaram o diâmetro de 6,3 mm e espaçamento de 8,00 cm conforme cálculo para o domínio 3.

Foram utilizadas duas barras como armadura superior, cada uma com diâmetro de 6,3 mm, enquanto para a armadura inferior, foram utilizadas duas barras de 16,0 mm, de modo a se obter uma seção transversal dimensionada para o domínio 3. O resultado obtido foi de uma taxa de armadura alta para a seção transversal retangular de 12x30 cm, conferindo uma área de aço de combate à flexão igual a 4,00 cm², conforme a norma estabelecida pela NBR 6118:2003.

Foi realizada uma comparação entre o consumo de concreto e aço das vigas estudadas em relação à viga retangular. Assim obteve-se os resultados abaixo:

Seção Retangular:

- Consumo Concreto: $0,108\text{m}^3$
- Consumo Aço: $18,556\text{kg}$
- Taxa de aço: $171,81\text{kg/m}^3$

Seção Trapezoidal:

- Consumo Concreto: $0,171\text{m}^3$
- Consumo Aço: $19,953\text{kg}$
- Taxa de aço: $116,68\text{kg/m}^3$

Seção Trapezoidal Invertida:

- Consumo Concreto: $0,171\text{m}^3$
- Consumo Aço: $19,953\text{kg}$
- Taxa de aço: $116,68\text{kg/m}^3$

Seção T:

- Consumo Concreto: $0,230\text{m}^3$
- Consumo Aço: $23,084\text{kg}$
- Taxa de aço: $100,36\text{kg/m}^3$

As 12 vigas utilizadas na pesquisa foram submetidas a ensaio de flexão em quatro pontos, onde a carga aplicada foi aumentando gradualmente até o ponto onde houvesse o decréscimo da carga por escoamento do aço e rompimento generalizado por compressão do concreto. Houve avaliação dos deslocamentos máximos e cargas para atingir a flecha máxima admissível, além da carga de ruptura das vigas.

A submissão das vigas ao ensaio aconteceu no LEE - Laboratório Experimental de Estruturas da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), que está situado no IParque. No local, foram utilizados os seguintes equipamentos disponibilizados pela instituição: Pórtico metálico montado sobre uma laje de reação; cilindro hidráulico marca ENERPAC com capacidade de 500 kN (Figura 2); transdutor de deslocamento (LVDT) de 100 mm marca HBM e equipamento de

aquisição de dados QUANTUM X, que emprega o software Catman Easy, da marca HBM.

Figura 2: Local e equipamentos utilizados no ensaio.



Fonte: Autor (2014)

3.1 EQUAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE CONCRETO ARMADO

As equações para o dimensionamento das seções transversais estão apresentadas a seguir. Onde a área de aço (A_s) foi predeterminada para que a seção transversal atue no domínio 3.

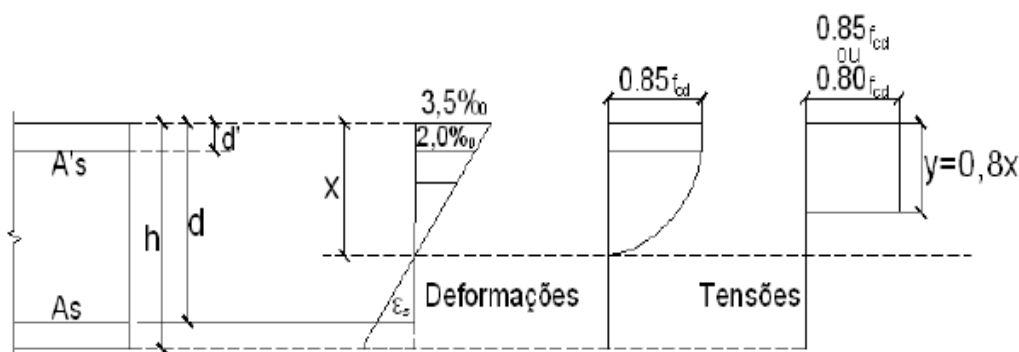
Conhecendo a área de aço, aplicou-se a equação 01 para encontrar o “ x ”, podendo assim, determinar o momento de serviço para as seções propostas.

$$x = \frac{A_s \times f_{yd}}{0,68 \times b_w \times f_{cd}} \quad (\text{Eq. 01})$$

$$M_d = 0,68 \times f_{cd} \times b_w \times x \times (d - 0,4x) \quad (\text{Eq. 02})$$

$$M_d = A_s \times f_{yd} \times (d - 0,4x) \quad (\text{Eq. 03})$$

Figura 3: Diagrama de tensões do concreto no estado limite último.



Fonte: Autor (2014)

Como mostra a Figura 3, é permitido que se substitua o diagrama parábola-retângulo por um retângulo de altura $0,8x$, onde x é a profundidade da linha neutra, que apresenta a tensão de cálculo: $0,85 \times f_{cd}$ para as zonas comprimidas de largura constante, ou largura crescente no sentido das fibras mais comprimidas, no caso do trabalho apresentado para as seções trapezoidal invertida, retangular e seção T a partir da linha neutra. Para as zonas de largura decrescente no sentido das fibras mais comprimidas, no caso da seção trapezoidal, aplica-se a tensão de cálculo: $0,80 \times f_{cd}$ (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2009).

3.2 DIMENSIONAMENTO DAS DIFERENTES SEÇÕES ADOTADAS

Para o dimensionamento da viga referência, isto é, a viga de seção retangular foram utilizados os cálculos abaixo, que referem-se ao máximo momento de serviço para a seção retangular. Os mesmos cálculos, posteriormente, foram empregados para as demais seções.

$$M_k = \frac{Md}{1,4} \quad (\text{Eq.04})$$

Aplicando-se a equação 01, foi encontrado o valor de “ x ” como sendo 11,93 cm, podendo assim, determinar o momento de serviço para as seções propostas. Substituindo o “ x ” na equação 03 temos como resultado o momento de dimensionamento, cujo valor é igual a 37,03 kN.m. Ainda para encontrar o momento

de serviço, foi substituído o valor de “Md” na equação 04 e encontrado o momento de serviço como sendo 26,45 kN.m.

Podemos comparar os valores das cargas médias de ruptura resistidas de cada seção proposta, a partir do momento de serviço calculado para a seção de referência (retangular), sendo os valores médios de cada seção apresentados a abaixo:

- Seção retangular igual a 120,85 kN;
- Seção trapezoidal igual a 109,70 kN;
- Seção trapezoidal invertida igual a 130,08 kN;
- Seção T igual a 161,48 kN.

Foi possível analisar que as seções resistiram um valor bem acima do calculado nos dando maior segurança para realização do estudo proposto.

3.3 CÁLCULO DA ÁREA DE AÇO

Para que as vigas trabalhem no domínio 3 foi necessário predeterminar a área de aço a ser utilizada, sendo prevista a utilização de duas barras de aço CA-50 com diâmetro de 16,0 mm, resultando em uma área de aço de 4,00cm². Dessa forma, pode-se verificar através da equação x/d em que domínio a viga se encontra, sendo “x” o resultado encontrado a partir da equação 01 com valor de 11,93 cm, e “d” sendo a medida da fibra mais comprimida até o centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada na seção, tendo como valor de “d” igual a 26,07 cm. A partir dos valores foi obtido o quociente da divisão o valor de 0,4578, valor este que se enquadra dentro do domínio 3, como proposto.

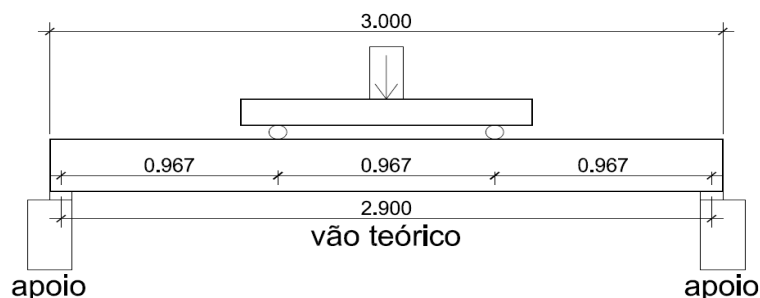
Portanto, havendo a confirmação para o domínio previsto para a seção retangular, a mesma área de aço foi mantida para as seções subsequentes, inclusive a seção T.

3.4 CÁLCULO PARA O LIMITE DE DESLOCAMENTO (FLECHA)

Para a determinação do limite de deslocamento, a norma estabelece que a flecha máxima admissível seja igual à razão entre o vão teórico do elemento estrutural dividido por 250, neste caso o vão teórico da viga que mede 300 cm se dá

através da dimensão de eixo à eixo dos seus apoios, sendo que cada apoio mede 10 cm e a viga foi apoiada nas duas extremidades na metade de cada apoio, compreendendo um vão teórico de 290 cm, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4: Modelo esquemático do vão teórico da viga



Fonte: Autor (2014)

Sendo assim, a determinação do limite de deslocamento, conforme estabelece a tabela 13.2 da NBR 6118:2003, a flecha máxima admissível é dada por $l/250$, sendo assim, 1,16 cm.

O limite de deslocamento foi verificado por meio do transdutor de deslocamento (Figura 5), que serviu para medir o deslocamento máximo admissível das vigas quando sujeitas às cargas aplicadas. Além disso, o aparelho avaliou o deslocamento total das vigas para as cargas de ruptura.

Figura 5: LVDT – Aparelho medidor do deslocamento (flecha)



Fonte: Autor (2014)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio da comparação dos resultados alcançados no experimento realizado e os resultados obtidos em trabalho anterior elaborado por Laurindo (2012), utilizado como referência, foi possível verificar a capacidade de carga das vigas dimensionadas no domínio 3 em comparação às vigas dimensionadas com área de aço mínima (Asmín).

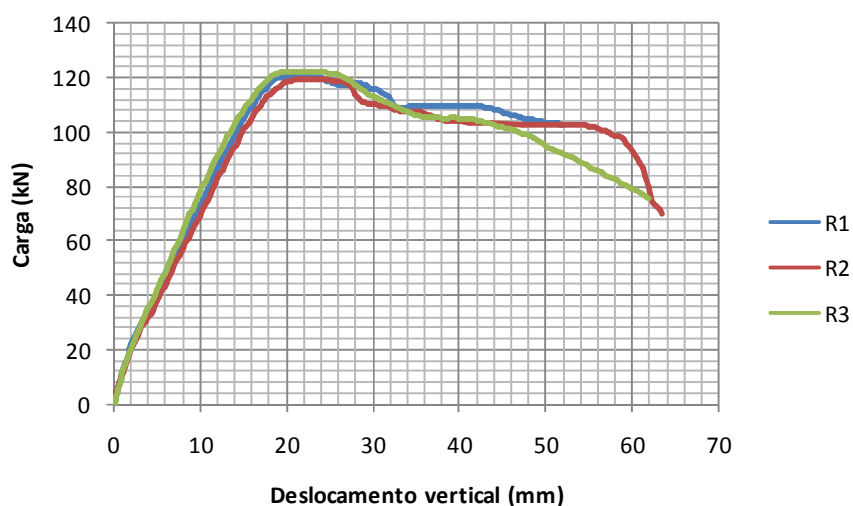
4.1 RESULTADOS DAS CARAGAS E DESLOCAMENTOS DE CADA SEÇÃO

Para a demonstração dos resultados foi necessário utilizar de abreviaturas para nomear cada tipologia de seção transversal, de modo a comparar os resultados obtidos no presente trabalho com estudo realizado anteriormente. Cada seção transversal recebeu sua abreviação específica conforme segue:

- (R) – seção retangular;
- (TR) – seção trapeziodal;
- (TRI) – seção trapezoidal invertida, cuja base inferior é menor que a base superior;
- (T) – seção T.

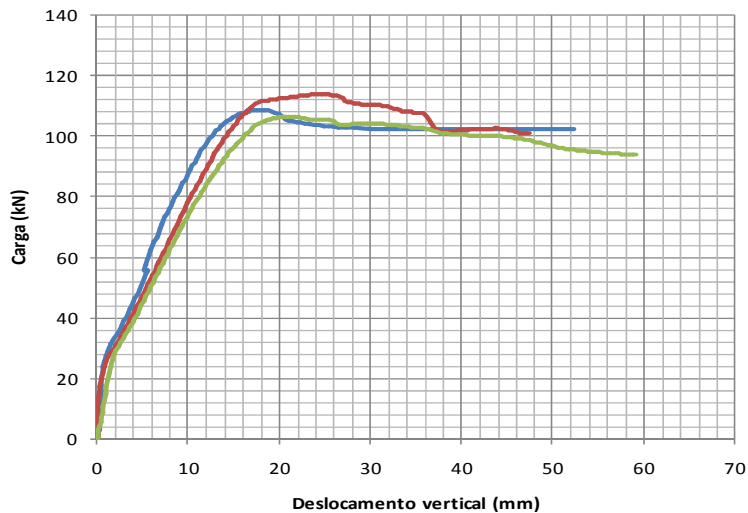
Para uma melhor análise, os dados obtidos a partir do trabalho experimental de cada uma das vigas foram plotados em gráficos e apresentados a seguir para cada uma das seções transversais, conforme mostram as Figuras 6, 7, 8 e 9.

Figura 6: Resultados da seção retangular.



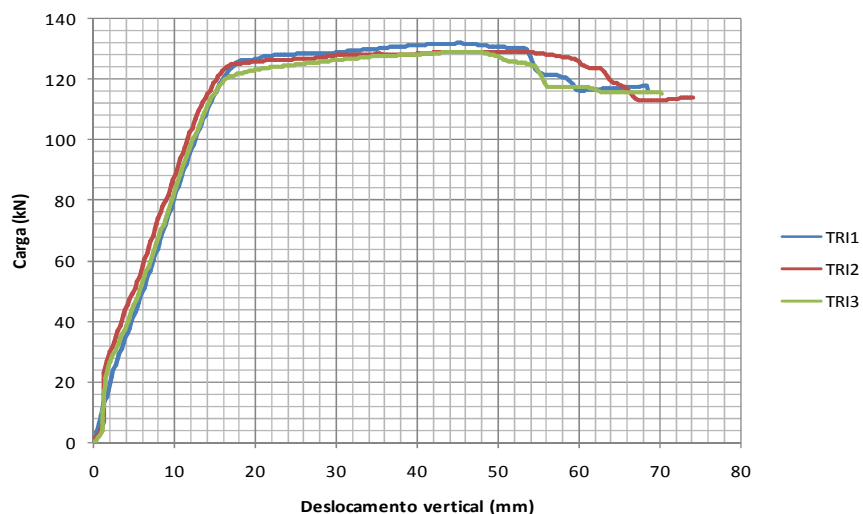
Fonte: Autor (2014)

Figura 7: Resultados da seção trapezoidal.



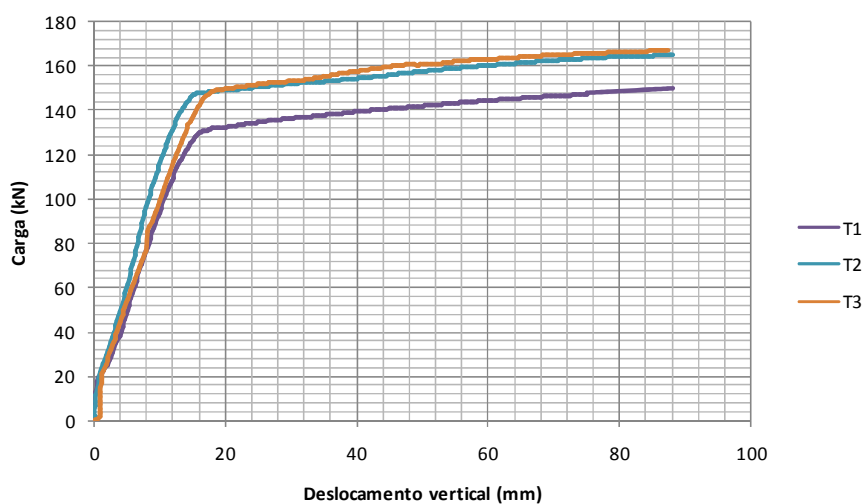
Fonte: Autor (2014)

Figura 8: Resultados da seção trapezoidal invertida.



Fonte: Autor (2014)

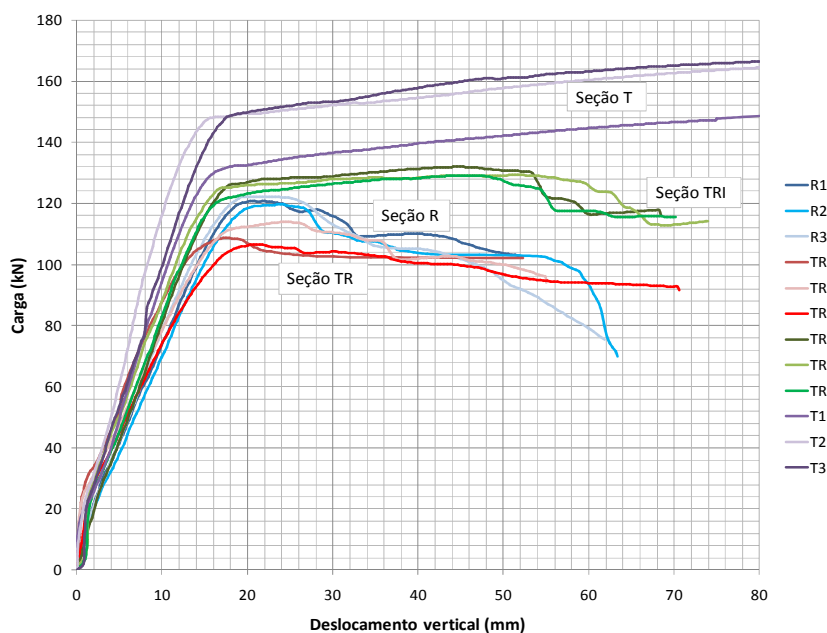
Figura 9: Resultados da seção T.



Fonte: Autor (2014)

Para comparar os resultados entre as tipologias de vigas, a Figura 10 mostra todos os resultados. Nota-se o aumento da fase de plastificação das vigas e rigidez para as vigas de seção TRI e T em comparação as vigas de seção R e TR.

Figura 10: Resultados de todas as vigas.



Fonte: Autor (2014)

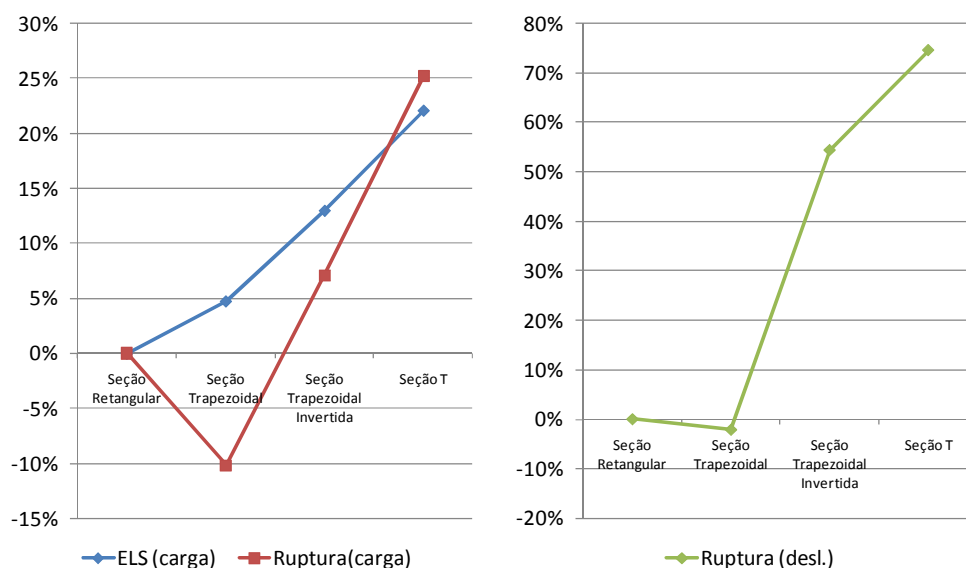
A análise das Figuras 6, 7, 8, 9 e 10 e da Tabela 1 referente às médias das seções, mostra que a viga de seção T suporta até 40,00 kN a mais que a seção de referência – retangular – para a carga de ruptura, porém com deslocamento muito superior. Em contrapartida, para o deslocamento máximo admissível, a viga de seção T comparada com a viga de seção retangular suportou uma carga superior pouco mais de 20,00 kN, visto que para esse tipo de seção, sabe-se bibliograficamente que a resistência é superior, isso pelo fato das abas da seção contribuírem na zona comprimida para a resistência total.

Tabela 1: Média de cada seção transversal. FELTRIN (2014)

	CARGA SERVIÇO (kN)	DESLOCAMENTO SERVIÇO (mm)	CARGA RUPTURA (kN)	DESLOCAMENTO RUPTURA (mm)
Seção Retangular	84,16	11,57	120,84	21,49
Seção Trapezoidal	88,35	11,56	109,70	21,04
Seção Trapezoidal Invertida	96,70	11,65	130,08	47,10
Seção T	107,97	11,61	161,48	84,52

Ao analisar as cargas médias de ruptura e de serviço de cada tipologia de viga em relação à viga referência de seção retangular (Figuras 11 e 12), é possível verificar que a carga média de serviço e de ruptura para a viga de seção T aumenta em 22,0% no ELS e 25,1% na ruptura, já na seção TRI aumenta em 13,0% no ELS e 7,1% na ruptura, enquanto que na seção TR aumenta em 4,7% no ELS e diminui em 10,1% na ruptura. Analisando os deslocamentos na ruptura, para a seção T ocorreu um aumento de 74,6%, na seção TRI aumentou em 54,4% e na seção TR praticamente se manteve igual com um decréscimo de 2,1%.

Figura 11: (a) Relação entre cargas de serviço e de ruptura em relação à viga referência de seção retangular (R). (b) Relação entre deslocamentos na carga de ruptura em relação à viga referência de seção retangular (R).



Fonte: Autor (2014)

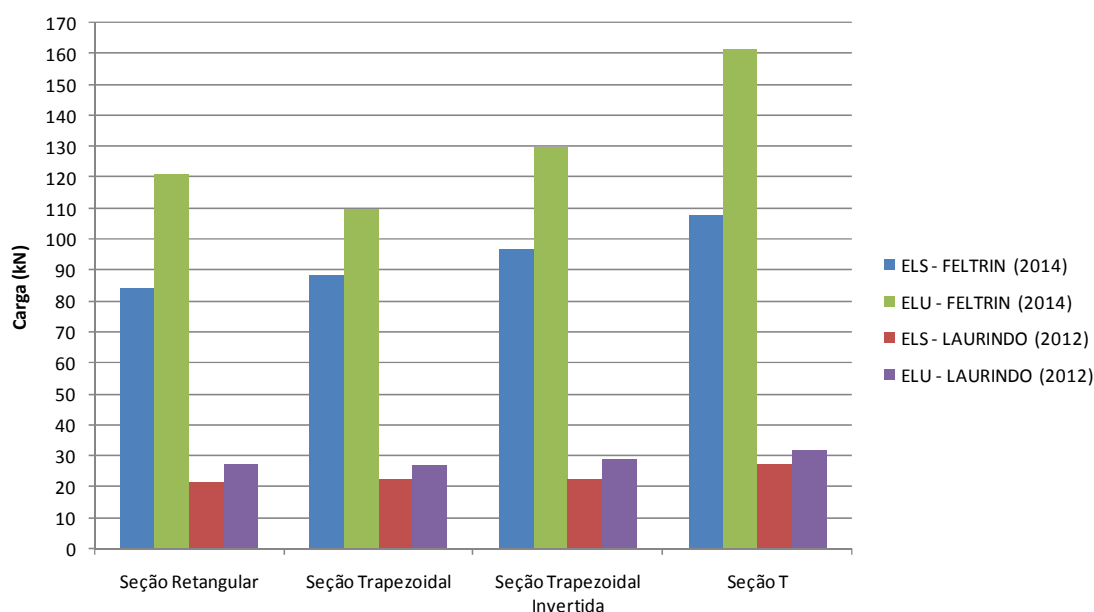
Com intuito de realizar uma comparação com os resultados obtidos por Laurindo (2012), que utilizou as mesmas dimensões de vigas e classe de concreto, porém com armadura de flexão mínima (2xØ6,3mm). A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos por Laurindo (2012) de carga de serviço e de ruptura e deslocamentos para todas as vigas testadas.

Tabela 2: Média de cada seção transversal. Laurindo (2012)

	CARGA SERVIÇO (kN)	DESLOCAMENTO SERVIÇO (mm)	CARGA RUPTURA (kN)	DESLOCAMENTO RUPTURA (mm)
Seção Retangular	21,65	11,55	27,52	22,05
Seção Trapezoidal	22,59	11,61	26,61	21,65
Seção Trapezoidal Invertida	22,56	11,70	28,77	22,56
Seção T	27,41	11,57	32,00	20,79

A Figura 12 mostra os valores médios das cargas de serviço e de ruptura para cada tipo de seção em relação aos valores obtidos por Laurindo (2012).

Figura 12: Relação entre cargas de serviço Feltrin (2014) X Laurindo (2012).



Fonte: Autor (2014)

Ao analisar as cargas de serviço entre as vigas é possível verificar que para cada seção, as vigas dimensionadas no domínio 3 resistiram a uma carga superior de até quatro vezes a mais do que as vigas propostas por Laurindo (2012), que foram dimensionadas com armadura mínima.

5. CONCLUSÕES

Nas obras utilizam-se geralmente vigas de seção retangular por ter um custo menor e de fácil execução. O intuito do presente trabalho foi verificar a resistência de diferentes seções dimensionadas no domínio 3 e analisar os benefícios que elas podem trazer para uma possível utilização de outra seção que possa substituir a então usual. Na pesquisa foram dimensionados e executados quatro tipos de seções, analisando sua carga de ruptura e a carga suportada para o deslocamento máximo admissível. Os resultados então obtidos permitiram concluir que as vigas de seção T suportam uma carga de ruptura 25% maior que a retangular que é a convencional, isto a teoria já nos mostra, porém o diferencial deste trabalho foi de executar a seção T sem armadura de costura, e sim apenas com uma armadura de distribuição, simulando uma laje armada sobre uma viga, onde os resultados obtidos foram muito satisfatórios resistindo a uma carga muito superior que a viga de seção retangular, trapezoidal e trapezoidal invertida.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto: Procedimentos. Rio de Janeiro, 2003

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Universidade Estadual Paulista Bauru/SP Março/2006. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/pbastos/Sistemas%20Estruturais/Fund%20Concreto.pdf> – acessado em agosto/2013

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2003. 3. ed. São Carlo, SP: EDUFSCAR, 2007.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto**: ensino, pesquisas e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

LAURINDO, Mateus Ronchi. **Análise experimental da influência da geometria na seção transversal na capacidade portante de vigas de concreto armado**. 2012. nº 47 de folhas. Trabalho de conclusão de curso, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, Criciúma.

MOHAMAD, Gihad. **Estruturas de Concreto Armado: Tecnologia, Materiais e Estruturas para Arquitetura**. Itajaí, SC: Univali, 2004.

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de concreto**: segundo a NB-1/78. Porto Alegre: ed. Globo, 1980.